

具有人工微结构的相移表面改写几何光学规律

费马(Pierre de Fermat)在近4个世纪前假设光线在两点之间会以最快的路径传播. 据此可以推导出斯涅耳折射定律(Snell's law). 考虑分别处于光学性质不同的两种材料界面两侧的两个点, 光从一点传播到另一点的路径将不一定是直线. 费恩曼(Richard Feynman)把这个问题比作一个跑步比游泳更快的救生员, 要去救一个落水者. 这个机敏的救生员会先跑到岸上的某一点再跳入水中, 而非仅仅是简单地跑直线, 这样做是为了适当增加在岸上的跑步距离, 减少在水中的游泳距离, 以使救人所需的时间最短. 同样, 一束光线从一个低折射率 n_1 的介质传播到一个高折射率 n_2 的介质中去的时候, 其入射角 θ_i 将比折射角 θ_r 更大, 由斯涅耳定律表示为: $n_1 \sin\theta_i - n_2 \sin\theta_r = 0$. 而根据光线沿最快路径传播的假设, 同样可以求得反射角 θ_r 的关系: $\sin\theta_i - \sin\theta_r = 0$.

最近, 哈佛大学 Federico Capasso 领导的研究组提出了一个费马、费恩曼和斯涅耳都没有考虑过的问题: 光在附加了随位置变化的相移的表面上会发生怎样的折射与反射? 在综合了理论和实验研究之后, 他们得出结论: 通过人工微结构构造一个由表面等离子激元天线或者其他光学共振器组成的相移表面, 可以让光线的传播偏离传统的折射定律和反射定律.

费马原理的本质是光传播的路径处于一个极值上, 此处光程关于其路径的微小偏移量的导数为0. 与极值光程邻近的光线, 在传播中耗用近乎相同的时间并拥有近乎相同的相位, 它们之间发生相长干涉. 而偏离极值光程的那些光线, 因其相位不同而在相互作用中表现为相消干涉. 所以费马原理可以被表述成固定位相原理. 如图1所示, 一条光线从A点发出, 分别折射到B点和反射到C点. B、C位置的相位分别为 ϕ_B 和 ϕ_C , 它们对入射点 x' 的位置不敏感. 也就是说, 对于光传播的路径来说, 相位 ϕ_B 和 ϕ_C 关于 x' 的导数 $d\phi_B/dx'$ 和 $d\phi_C/dx'$ 均为0.

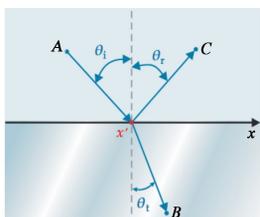


图1 依据费马原理, 光从A点发出, 经折射和反射分别到达B点和C点, 各自拥有相位 ϕ_B 和 ϕ_C , 这个相位是和入射点 x' 微小移动无关的常数. 通过引入一个是位置函数的相移的表面, 在折射和反射界面上可以改变光线的路径, 实现具有极值的光程, 因此, 入射角 θ_i 、折射角 θ_r 和反射角 θ_t 之间的关系也会随之改变

Capasso 研究组用更一般性的解释去阐述费马原理. 假设折射和反射的界面经过了人工“修饰”, 光在折射和反射过程中被附加了一个是位置函数的相位变化. 这样光在传播中就会选择入射点 x' 以保持某一极值的光程, 从而可能改变

折射和反射的一般规律. 他们对斯涅耳定律做了如下修改: $n_1 \sin\theta_i - n_2 \sin\theta_r = (\lambda/2\pi) d\Phi/dx$; 对于反射光, $\sin\theta_i - \sin\theta_r = (\lambda/2\pi) d\Phi/dx$. 这里 λ 是光的波长.

传统意义上的斯涅耳定律处理的两种介质之间的分界面是一个均匀的、各向同性的边界. 若沿表面引入一个由人工微结构引起的位相函数, 光的折射和反射则可以根据人的意愿来调控. 负折射、多临界角全反射等其他奇异的性质变得平常起来. 其实这里讨论的这个效应与超构材料(meta-materials)不同. 超构材料因为它反常的介电系数和磁导率而影响光的传播, 但是传统意义上的斯涅耳定律仍然成立(详见 *Physics Today* 2010年10月刊第32页, Martin Wegener 和 Stefan Linden 的文章). 而 Capasso 研究组设想的这种结构实际上是一种超构表面(metasurface).

人们设想用表面等离子激元天线构造一种超构平面, 通过天线的共振性质来调控光的振幅和相位延迟. 这在射频波段是比较容易实现的(详见 *Physics Today* 2011年7月刊第47页, Lukas Novotny 的文章). 但是, 最简单的天线, 比如一个金属直棒, 只能对相位进行有限的调控, 它产生的相位延迟范围只能从0到 π , 而预期的散射振幅也非常有限.

Capasso 的合作者 Zeno Gaburro 提出了一个重要的结构——V型天线. 因为它具有两种独立正交的共振模式, 其散射光的相位延迟可以从0到 2π 变化. 通过麦克斯韦方程组, 他们设计了4种不同形状的V型天线, 这些天线及其镜像在0— 2π 的范围内产生了以 $\pi/4$ 为增量的多种相位延迟. 把V型天线按照图2所示那样排布, 那么这些天线组成了一个相移二维变化的表面, 从而去验证所谓的广义斯涅耳定律. 这个表面上相移的梯度, 即 $d\Phi/dx$, 可以通过调整不同天线之间的距离来调控. 只要天线之间的距离以及天线的自身尺度小于入射光波长, 材料就可以当做等效介质来处理. 目前在中红外波段上的实验结果与理论预言相当吻合.

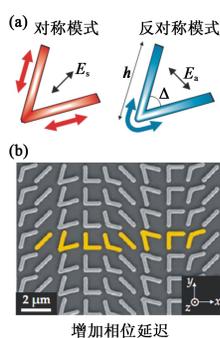


图2 等离子激元偏移 (a)V型天线因为其两种独立正交的共振模式, 散射光的相位延迟可以从0到 2π 变化. 被激发的表面等离子激元振荡分别如红色和蓝色箭头所示. 辐射场的方向分别沿着 E_s 和 E_a 的方向; (b)通过改变臂长 h 和两臂间的夹角 Δ , 哈佛大学的研究者在硅片上设计了一系列可以使散射光相移渐增的V型天线. 图为扫描电镜照片

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权, 与 *Physics Today* 合作的项目

Capasso 等人现在已经开始设想应用超构表面进行折射和反射的调控,从而实现一些有重要应用价值的器件.例如由 V 形天线排布而成的二维相位光栅可以实现顺时针增加的相位延迟,这个厚度在亚波长尺寸的相位片可以成功地把一个平面波调控成涡旋光束.

宾夕法尼亚大学的 Nader Engheta 教授指出:“在亚波

长尺度,能按照人为意愿调控光的相位,将简单的光束调控为复杂的光束,这是一个很大的突破,是一项非常漂亮的工作.”

(南京大学 熊翔 编译自 Ashley G. Smart, *Physics Today*, 2012, (11): 12, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)